

УДК 621.039.743

Опыт эксплуатации системы вакуумной осушки контейнеров с ОЯТ РБМК-1000 при переводе на сухое хранение

В. К. Ефимов¹, Т. Б. Маликов¹, Ю. А. Мигров¹, М. О. Потанкин¹, В. Н. Симонов²

¹ ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

² Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Ленинградская атомная станция, г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

Аннотация

В статье обобщены результаты промышленной эксплуатации системы вакуумного осушения металлобетонных контейнеров с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) РБМК-1000. Приведены данные по времени осушения контейнеров и объему удаляемой влаги. Предложены технические решения по совершенствованию автоматизированной системы управления подготовкой металлобетонных контейнеров УКХ-109 к сухому хранению.

Ключевые слова: отработавшее ядерное топливо, перевод на сухое хранение, металлобетонный контейнер, опыт промышленной эксплуатации, автоматизированная система управления подготовкой.

UDC 621.039.743

Operating experience of vacuum drainage system of RBMK-1000 SNF casks during the transfer to dry cask storage

V. K. Efimov¹, T. B. Malikov¹, Yu. A. Migrov¹, M. O. Potapkin¹, V. N. Simonov²

¹ FSUE "Alexandrov NITI", Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

² Branch of JSC "Rosenergoatom Concern" Leningrad nuclear power plant, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract

This paper summarize the industrial operation results for vacuum drainage system of metal concrete casks with spent nuclear fuel (SNF) of RBMK-1000 reactor. Data for cask drainage time and volume of moisture drained are given. Technical solutions for improvement of the automated control system for preparation of a spent fuel storage package to dry cask storage are proposed.

Key words: spent nuclear fuel, dry cask storage, metal concrete cask, industrial experience, automated control system for preparation.

В 2012 году на Ленинградской АЭС (ЛАЭС) был введен в строй первый отечественный комплекс перевода ОЯТ РБМК-1000 на сухое контейнерное хранение. Основной целью создания данного объекта является повышение безопасности АЭС за счет перевода ОЯТ на сухое хранение и вывоза его с территории станции. Кроме того, освобождение «мокрого» хранилища Ленинградской АЭС фактически обеспечило продолжение работы станции, так как приреакторные бассейны и ХОЯТ были заполнены на 99% (рис. 1).

Одной из основных операций процесса перевода ОЯТ на сухое хранение является создание необходимых параметров среды (влажность менее 20 г/м³) в контейнере хранения ОЯТ и проверка герметичности уплотнений.

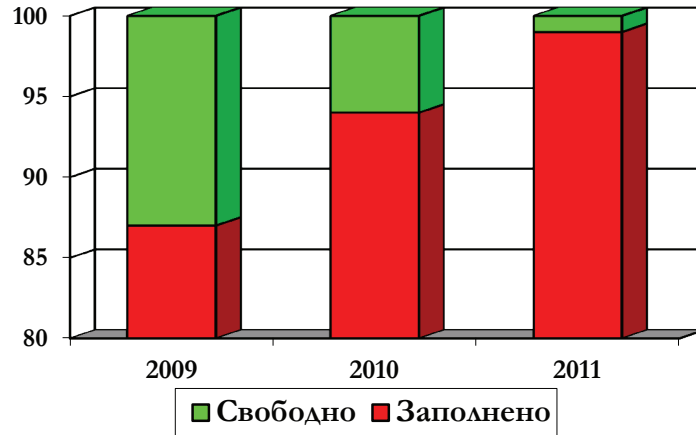


Рис. 1. Динамика заполнения бассейнов выдержки Ленинградской АЭС.

Технология перевода ОЯТ на сухое хранение на практике реализована в ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова» в 2000–2007 гг. на полномасштабном экспериментальном стенде СМ-Э332 [1, 2]. Стенд СМ-Э332 состоит из натурального металлобетонного контейнера, технологических систем осушки и откачки газов, системы измерений теплофизических параметров контейнера и контроля герметичности. Отработка технологии на стенде СМ-Э332 показала необходимость автоматизации данного технологического процесса.

Специалистами ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова» в кооперации с другими организациями была разработана и реализована автоматизированная система управления подготовкой металлобетонных контейнеров УКХ-109 с ОЯТ (АСУП СМ-821) к сухому хранению, которая осуществляет в автоматическом режиме контроль герметичности крышек контейнера, осушку ОЯТ, заполнение полостей контейнера газами хранения. Трехуровневая распределенная архитектура АСУП СМ-821 представлена на рис. 2.

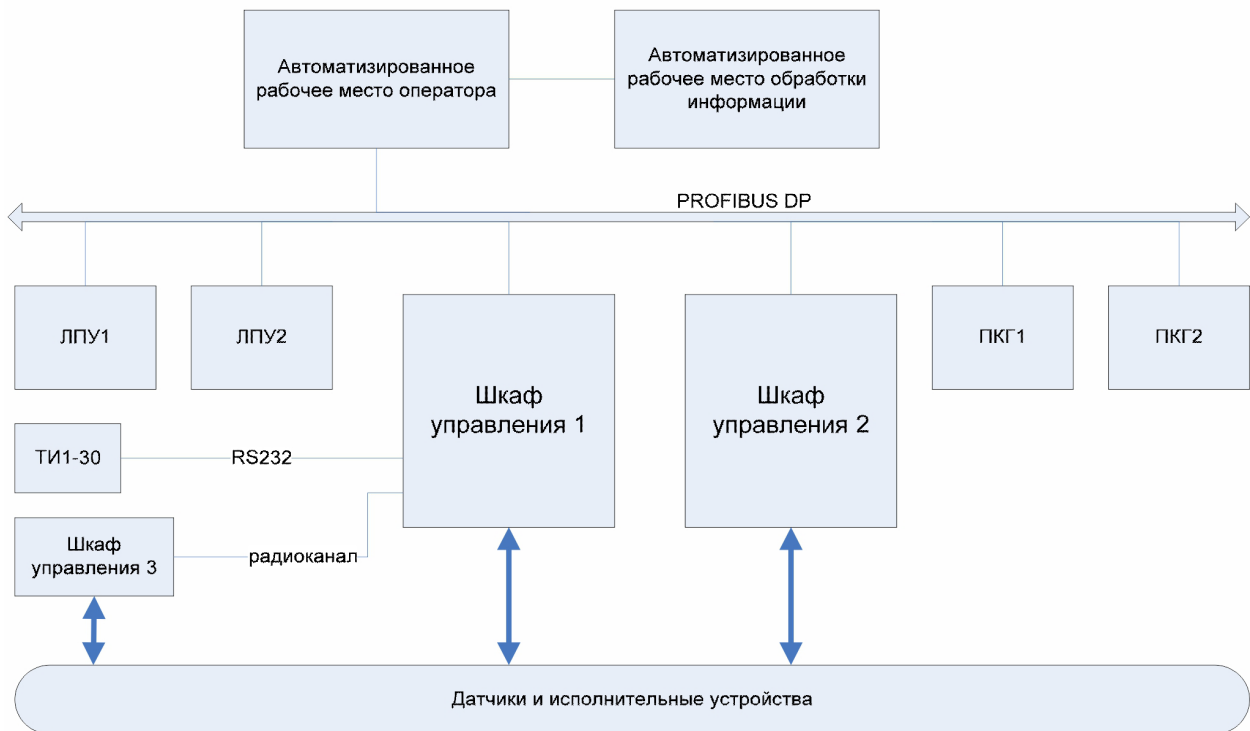


Рис. 2. Структурная схема АСУП СМ-821.

На нижнем уровне представлены датчики, исполнительные устройства, насосные агрегаты, холодильная установка, локальные пульты управления (ЛПУ), приборы контроля герметичности (ПКГ), а также гелиевый искатель течи ТИ1–30. Для датчиков давления используется интерфейс 4–20 мА, датчики температуры подключаются по четырехпроводной схеме. Обмен информацией с интеллектуальными датчиками и приборами производится при помощи последовательных каналов связи.

Средний уровень системы включает шкафы управления ШУ1 и ШУ2, построенные на базе контроллеров SIMATIC CP-314–2DP. Датчики газобаллонной станции находятся в вынесенном за пределы здания ХОЯТ помещении и подключены к собственному узлу — Шкафу управления 3 (ШУ3). Шкафы управления обеспечивают сбор информации от 35 аналоговых и 78 дискретных входных каналов, а также выдачу управляющих воздействий на 40 дискретных выходных каналов различного типа.

Верхний уровень представляет собой автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора, на котором осуществляется управление и контроль параметров данного технологического процесса. АРМ обработки информации служит для формирования протоколов на контейнеры с ОЯТ, подготовленные к сухому хранению. Протоколы содержат информацию о параметрах осушки и пройденных точках контроля герметичности.

Все узлы комплекса объединены при помощи локальной сети PROFIBUS–DP на основе интерфейса RS-485.

Эксперименты на стенде СМ-Э332 и опыт промышленной эксплуатации системы осушки АСУП СМ-821 на ЛАЭС показали, что в зависимости от величины давления парогазовой смеси в контейнере можно условно выделить три различные стадии технологического процесса вакуумного осушения УКХ-109 с ОЯТ. Проиллюстрируем стадии технологического процесса вакуумного осушения УКХ-109 с ОЯТ на типичном примере осушки контейнера 27Э. Как видно из рис. 3, 4, осушка контейнера 27Э длилась 55 часов, при этом из контейнера удалено 9 литров воды.

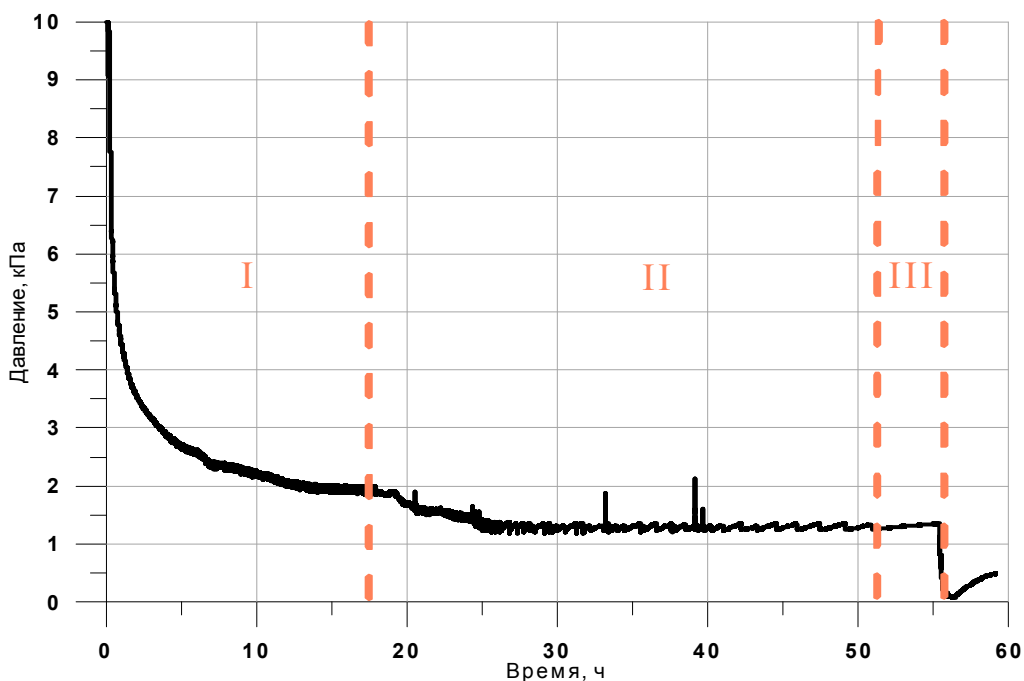


Рис. 3. Давление на выходе из контейнера 27Э.

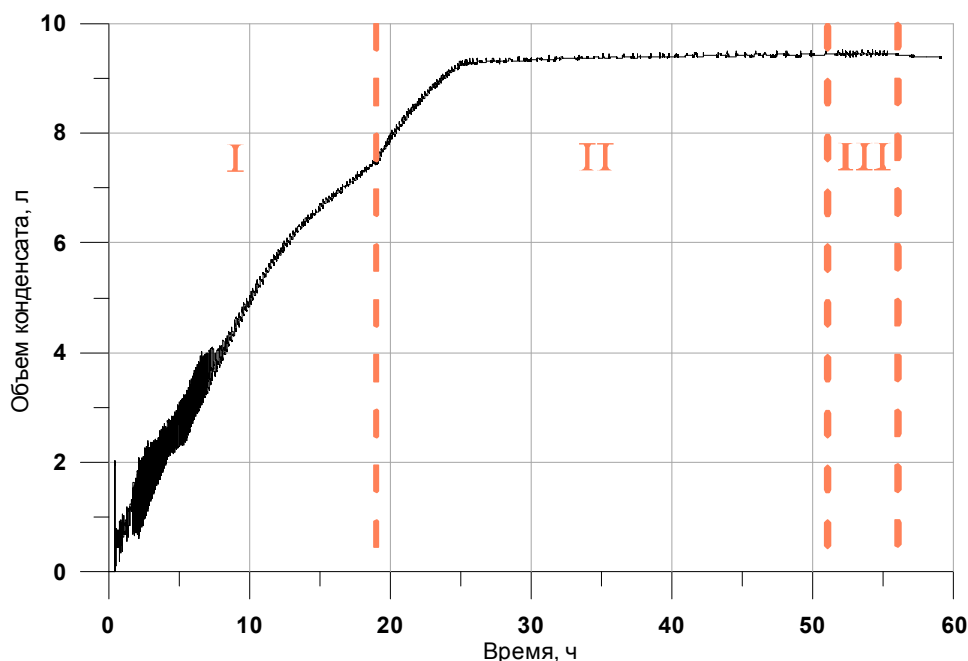


Рис. 4. Уровень воды в конденсаторе.

На начальной стадии (I) процесса вакуумирования при снижении давления в контейнере от исходного ~ 110 кПа до 10 кПа происходит откачка парогазовой смеси, состоящей преимущественно из воздуха. Пар, образующийся в ампулах с ОЯТ, конденсируется на более холодных стенках контейнера, на массивной крышке и в клапане внутренней полости. На этой стадии осушки откачка смеси может выполняться с максимально возможной производительностью вакуумного насоса. При снижении давления ниже 10 кПа начинается активная фаза испарения влаги в контейнере, её удаления и осаждения в баке-конденсаторе. С целью исключения захлаживания внутренних поверхностей и дна контейнера ниже температуры окружающей среды, давление на выходе из контейнера должно быть выше давления насыщения водяных паров при температуре окружающей среды в помещении поста подготовки УКХ-109.

Добиться эффективного влагоудаления позволяет автоматизированная система управления подготовки металлобетонных контейнеров УКХ-109 к сухому хранению. Необходимый уровень давления устанавливается автоматически при помощи регулирующего клапана, с помощью которого обеспечивается высокая точность поддержания параметров системы. Добиться подобного результата при ручном управлении не представляется возможным.

Как видно из рис. 4, большая часть влаги удаляется из контейнера с ОЯТ на первой (I) стадии осушки.

Вторая стадия (II) вакуумной осушки характеризуется снижением давления в контейнере до давления насыщенного пара по температуре в баке-конденсаторе. Скорость откачки устанавливается минимальной для предотвращения возможности выхода водяных паров за границы бака конденсатора. Практически вся оставшаяся влага выводится из контейнера в первые 6–8 часов II-й стадии осушки. По завершении II фазы достигается основной критерий «сухости» контейнера УКХ-109 — влагосодержание менее 20 г/м^3 .

Третья (III) стадия — контроль остаточного влагосодержания — это стадия, на которой подтверждаются требуемые параметры среды в контейнере. Проводится контроль прироста

давления за 4 часа. При приросте давления в контейнере за этот промежуток времени более 100 Па АСУП возвращает технологический процесс на вторую стадию осушки и повторяет ее. При приросте давления менее 100 Па контроль считается пройденным. Контейнер передается для проведения операций контроля герметичности полостей.

Созданный комплекс обеспечивает необходимые параметры технологического процесса и требуемые характеристики среды во внутренней полости УКХ-109. Четкая система организации взаимодействия автоматики и человека позволили свести к минимуму скрытые нарушения, связанные с человеческим фактором, и существенно уменьшить фоновую радиационную нагрузку на персонал за счет сокращения объема ручных операций. Ввиду сложности алгоритма технологического процесса специалистами ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова» осуществляется авторский надзор и сопровождение технических средств АСУП (СМ-821) подготовки УКХ-109 к сухому хранению. При этом специалистам ЛАЭС оказывается квалифицированная помощь как по работе оборудования в штатном режиме, так и по диагностике отказов, проверке функционирования и герметичности системы. На основе анализа остановов технологического процесса выдаются рекомендации по устранению выявленных отклонений.

За время промышленной эксплуатации АСУП (СМ-821) осуществлялись следующие виды сопровождения:

1. Обучение персонала. Достаточно большое число отказов на ранних этапах функционирования системы было связано с ошибочными действиями или бездействием операторов. Для исключения этих ситуаций проводились обучение приемам работы с автоматизированной системой и инструктаж, в рамках которых персоналу разъяснялись ошибочные действия, приводящие к останову технологического процесса, а также порядок действий в данных ситуациях.

2. Дистанционная поддержка. В большинстве случаев для определения причин нарушения технологического процесса специалисту достаточно знать несколько основных параметров, которые полностью характеризуют состояние автоматизированной системы. При возникновении ситуаций, требующих лишь консультаций, оператору ЛАЭС достаточно сообщить специалисту НИТИ по телефону или электронной почте заранее установленный перечень параметров. На основании этих сведений достаточно точно можно сделать заключение, какие действия оператором выполнены ошибочно, или выполнение каких действий ожидает система.

3. Выезд на место. При эксплуатации системы осушки возникают ситуации, когда требуется более глубокий анализ причин, вызвавших останов в работе. Система осушки работает на очень низких давлениях, а основным критерием «осушенности» контейнера является приrost давления за определенный интервал времени. В случае возникновения больших напеканий в контейнер воздуха из окружающей среды, система не сможет завершить осушку. Для выявления подобных дефектов требуется личное присутствие специалиста и анализ протоколов работы системы. Путём поочередного «отсечения» элементов системы можно выявить место напекания. Дефект устраняется службами ЛАЭС. Вся технологическая информация и действия персонала фиксируются с частотой 1 Гц и может быть использована для анализа работы оборудования и персонала.

4. Выявление отказов и помощь в их устранении. В процессе эксплуатации системы происходили отказы оборудования. Специалисты НИТИ оказывали помощь работникам цеха тепловой автоматики и измерений (ТАИ) в выявлении дефектов и выдавали рекомендации по их устранению.

К настоящему времени (за период с 2012 г. по 2019 г.) накоплен значительный опыт и получены уникальные данные по технологии вакуумной осушки металлобетонных контейнеров с ОЯТ. К середине 2019 г. завершены работы по подготовке к сухому хранению 215 контейнеров с ОЯТ, т.е., в среднем, за год осуществлялась подготовка 30 контейнеров (см. рис. 5).

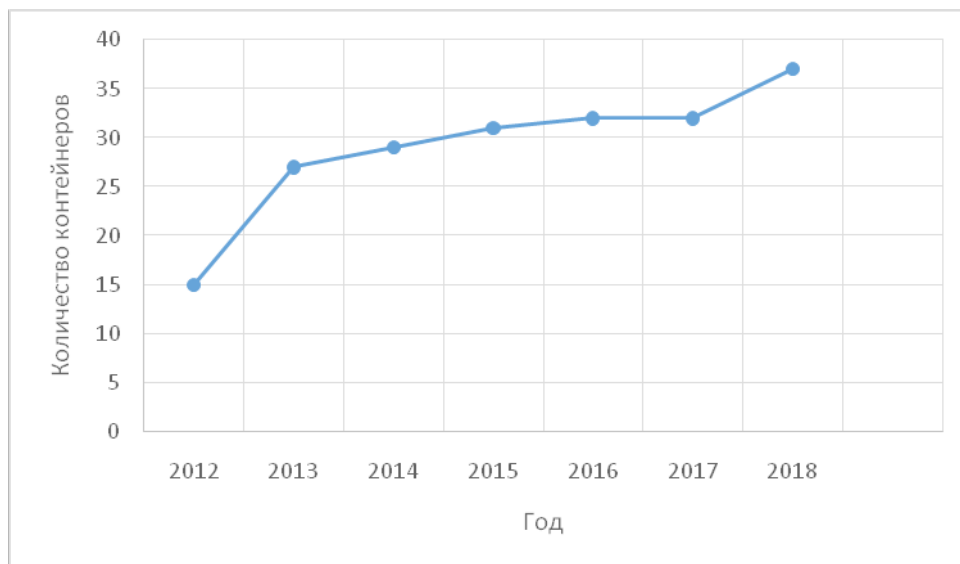


Рис. 5. Зависимость числа контейнеров, осушаемых за один год, от времени.

Результаты статистической обработки данных по количеству удаленной влаги из контейнеров с ОЯТ и времени осушки контейнеров ОЯТ за период с 2012 г. по 2018 г. представлены на рис. 6, 7.

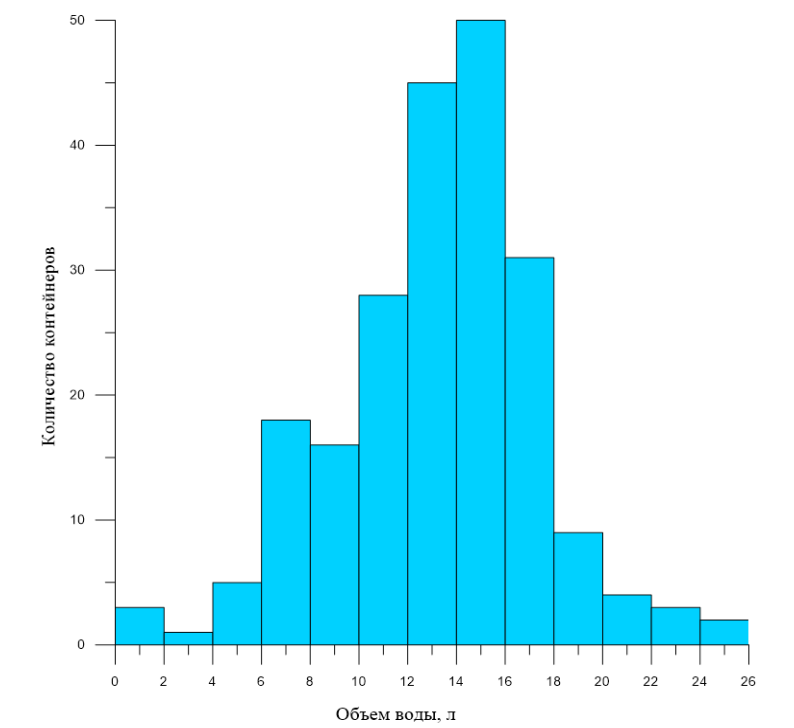


Рис. 6. Статистические данные по количеству удаленной влаги из контейнеров с ОЯТ (среднее значение $m_{\text{cp}} = 12.3$ л; среднее квадратическое отклонение $\sigma = \pm 32\%$).

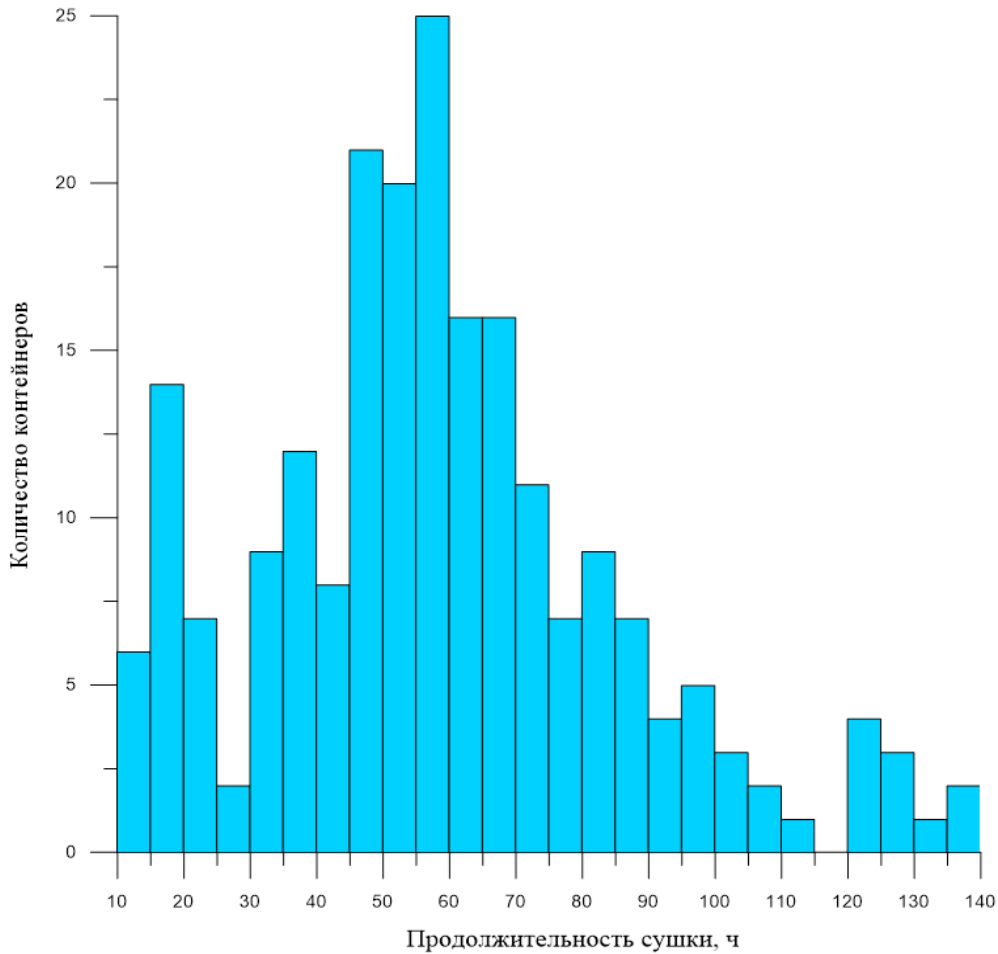


Рис. 7. Статистические данные по времени осушки контейнеров с ОЯТ (среднее значение $T_{cp} = 59$ ч; среднее квадратическое отклонение $\sigma = \pm 45\%$).

Большое время осушки некоторых контейнеров с ОЯТ (см. рис. 7) объясняется газовыделением из условно-негерметичных сборок, что препятствует корректной оценке влагосодержания в контейнере методом прироста давления и, как следствие, увеличивает количество повторений контроля. Время же осушки менее 24 часов характерно для контейнеров с неполной загрузкой ампулами с ОЯТ.

По результатам технического сопровождения были сформулированы следующие рекомендации по модернизации системы, оснащению дополнительным оборудованием и разработке новых инструкций для персонала.

1. Осуществление перехода на двухпостовый режим работы системы. При подготовке контейнеров к сухому хранению имеется ряд операций, которые могут осуществляться параллельно для двух контейнеров. Для ускорения процесса подготовки принято решение о переходе на двухпостовый режим осушки и последующего контроля герметичности контейнеров.

2. Введение в систему датчиков влажности. При возникновении газовыделения ОЯТ в контейнере определение влажности паров воды манометрическим методом становится затруднительным (из-за паразитного роста давления в контейнере). Для дополнительного контроля влажности паров в систему введены два датчика влажности (для контроля в магистрали системы осушки и в системе подачи инертных газов).

3. Введение в систему датчиков газового контроля. При работе системы с реальным топливом в отдельных случаях наблюдалось существенное отличие темпа роста давления в контейнере при осушке от среднестатистических значений. Исследования проб газа показали наличие процессов газовой выделения в контейнерах. Для своевременного оповещения операторов о появлении газов в систему добавлен газоанализатор.

4. Изменение типа клапанов и датчиков давления. Для улучшения качественных показателей работы системы принято решение о замене типа клапанов давления, способных обеспечить необходимую герметичность в системе при пониженных давлениях, а также о замене датчиков давления с более широким диапазоном измерения.

В ближайшей перспективе на ЛАЭС планируется ввести в обращение новый контейнер УКХ-109Т для транспортировки некондиционного топлива. Это потребует проведения дополнительного анализа физических процессов, происходящих внутри осушаемого контейнера, и, как следствие, корректировки программного обеспечения АСУП (СМ-821).

Заключение

1. В процессе промышленной эксплуатации системы вакуумного осушения при переводе ОЯТ РБМК-1000 на сухое хранение подтверждена эффективность автоматизированной системы управления подготовкой (АСУП СМ-821) как с точки зрения достижения требуемых параметров среды в контейнерах, так и снижения радиационной нагрузки на персонал.
2. Приобретенный в процессе осушки контейнеров с ОЯТ опыт позволил определить пути дальнейшего совершенствования технических решений по АСУП СМ-821.

Литература

1. Экспериментальное обоснование технологии вакуумной осушки отработанного ядерного топлива реактора РБМК-1000 / В. К. Ефимов, Т. Б. Маликов, Ю. А. Мигров, С. В. Самусь, О. Д. Чёрный // Технология обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2016. № 1 (3). С. 18–28.
2. Внедрение технологии вакуумной осушки МБК с ОЯТ РБМК-1000 на Ленинградской атомной станции / В. К. Ефимов, В. М. Зозуля, А. В. Лесников, Т. Б. Маликов [и др.] // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. Україна. 2011. № 42. С. 32–40.